

## 液体を入れた積層複合殻の振動現象に関する研究

著者	岡崎 勝利
号	51
学位授与番号	2180
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37559">http://hdl.handle.net/10097/37559</a>

氏 名	おがさき かつとし 岡崎 勝利
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 19 年 3 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 4 1 年 3 月 山形大学工業短期大学部機械科卒業
学 位 論 文 題 目	液体を入れた積層複合殻の振動現象に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 高木 敏行 東北大学教授 福永 久雄 東北大学教授 裘 進浩

## 論 文 内 容 要 旨

工業界では内部に液体の入った円筒殻の利用は数多く見られロケット，燃料タンク，回転胴，圧力容器など多方面に用いられている．最近では軽量化と耐食性などの問題から，繊維強化複合材料を使用する例も見られるようになってきた．すでに繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic)円筒タンクは耐化学薬品などの理由で貯槽タンクとして用いられている．最近，炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforce Plastic)は，高い比強度，比剛性のため，エネルギーの省力化を目的として，航空機を始め，新幹線車体などに利用されている．さらに，航空宇宙空間での輸送コスト低減のために，使い捨て型宇宙輸送機から完全再使用型宇宙輸送機へと切り換える研究がはじまった．そのためには構造部材として，もっとも大きな容積と重量を占める極低温推進薬タンクの一層の軽量化を図ることが重要要件である．そこで，CFRP 製のタンクの開発が進められており，最近，そのタンクの低温強度についての報告がなされている．また，燃料電池用の水素貯蔵用の高压タンクも CFRP を用いて開発されている．今後，その他の分野でも CFRP 殻の多くの利用が考えられる．そのため，液体を部分的に満たした積層複合殻における殻と液体との連成振動の特性を明らかにすることは，これら構造物の設計上重要となる．

CFRP 積層複合材の動的研究は種々報告されており，梁，板などは実験も行われているが，積層円筒殻の振動に関する実験的研究は少なく，理論解析が大半を占める．また，液体を入れた積層複合円筒殻の振動特性に関しても理論的な報告が多い．さらに，液体の入った積層楕円筒殻の振動特性に関しての報告は理論解析も実験的研究についてはほとんど見当たらない．上記の報告では，積層殻の振動特性には積層配向角の組合せが振動への影響をおよぼす一つの大きな要因であることを指摘しているものが多い．また，液体が入る事で，その液位による影響も考慮しなければならない．現在使用されている殻容器の大半は等方性材料である．振動解析において積層殻と等方性殻と具体的に比較された例は少なく，それらについての実験による報告も見当たらない．

本研究では液体の入った炭素繊維強化プラスチック積層複合殻の振動特性の基礎的知見を得るため，理論と実験により，それらの殻の振動挙動を解析することを目的とした．はじめに，理論解析では有限要素法(Finite Element Method)を用いて，厚肉積層円筒殻に液体が入った場合の自由振動解析を

単一円筒殻と多重同心円筒殻について報告する。つぎに、CFRP プリプレグを積層し、積層円筒殻と積層楕円筒殻を製作した。比較のために、積層殻と同寸法の等方性殻も製作し、それらの殻の振動応答を実験により計測し、その振動特性を解明した。これらのことから、積層材特有の配向角による振動特性の変化、内部液体が殻の振動特性に及ぼす影響、積層材料と等方性材料との2つの材質による振動特性の変化を明らかにした。

本論文は6章から構成されている。

第1章の序論では、この論文の背景、意義、目的と論文の構成について述べる。

第2章では、CFRP 積層複合厚肉円筒殻に液体を入れた場合の自由振動を有限要素法により用いて解析した。内部液体は非粘性、非圧縮性と仮定した。積層の基本である2層アングルプライ積層構造を考え、各積層を等厚とした。一つは母線方向を基本軸( $0^\circ$ )として、それに対して平行な積層と、もう一層は任意の配向角( $\phi$ )で積層した(片側積層)円筒殻、もう一つは基本軸に関して互に対称の配向角で積層した(対称積層)円筒殻の振動特性について調べた。ここでは、おもにバルジング型の振動特性を調べるとともに自由表面の鉛直方向変位量についても解析した。とくに、配向角と液位が振動数と振動モードへ及ぼす影響について調べた。各振動次数では、振動数の最大値を示す位置は配向角に依存する。液位比を変化させると、配向角の小さい範囲で、振動数の変化は小さいが、配向角が大きくなるとそれは増大する。高次の振動数は片側積層では配向角が大きくなってもあまり低下しないが、対称積層の場合は配向角が大きくなると、ある配向角で最大値を示した後に低下する。振動モードは、配向角が小さい場合には片側積層でも対称積層でも大きな違いは認められないが、配向角が大きくなると両積層の間に相違が認められた。

第3章ではCFRP 積層複合同心二重厚肉円筒殻に液体を入れた場合の自由振動について、有限要素法により理論解析を行った。理論解析では多重同心円筒殻として扱い、数値計算は二重同心円筒殻について行った。解析手法は2章と同じであり、各円筒殻の積層はすべて2層アングルプライ積層(対称積層)とした。円周方向波数 $n \geq 1$ の範囲についてのバルジング型の振動特性と自由表面の鉛直方向変位量についても解析した。2章と同様に、配向角、円周方向波数そして内側殻と外側殻の液位差による積層二重同心厚肉円筒殻の振動数と振動モードへ及ぼす影響について調べた。外側殻内の液位は系の振動数と振動モードに大きく影響する。とくに、内側殻壁の振動モードは主に外側殻内の液位に依存し、液位が高くなるにつれて殻壁全体の振動へ移行する。内側殻壁と外側殻壁の振動モードは振動次数と関係し、母線方向波数が奇数の場合には逆位相、偶数の場合には同位相のモードで振動することを示した。

第4章では異なる積層構造をもつ2種類のCFRP 積層複合円筒殻を製作した。その積層構造の一つはアングルプライ積層で、積層順序は円筒殻内側から $[0^\circ/-45^\circ/45^\circ/90^\circ]$ の4積層であり、もう一つはクロスプライ積層で、積層順序は $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ の5積層である。内部の液体は円筒殻の高さに対して、0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 の比で入れた。それらの殻を上端自由/下端固定の支持条件下で強制水平加振を加え、振動応答に基づく振動特性解析を実験的に行った。配向角による違いなども示す。さらに、等方性殻として鋼製殻を製作し、それらの結果を材質による違いを含めて比較・検討した。あわせて、ANSYS Ver.8.1 を用いて FEM 解析も行い、実験結果と比較・検討した。からの円筒殻において、アングルプライ積層殻の振動数は円周方向波数が小さい領域では等方性殻の振動数より高く、円周方向波数の大きい領域では等方性殻の振動数より低い。それに対し、クロスプライ積層殻と等方性殻の振動数の関係は円周方向波数 $n$ の大・小の領域でアングルプライ積層と逆の挙動を示す。このように積層構造と材質の違いが振動特性に影響をおよぼすことを明らかにした。しかし、

液体が入り、その液位が高くなるにしたがって、いずれの領域でも積層円筒殻の振動数は等方性殻よりも低くなり、液体の質量が殻の振動に大きな影響を与えることを示した。部分的に液体の入ったアングルプライ積層殻の振動モードでは、円筒の上部と下部で円周方向波数の異なる混合モードが観察された。これはアングルプライ積層構造による、曲げ変形と伸張変形のカップリング効果と、部分的に入っている内部液体の質量効果による殻壁の曲げ変形への影響などにより起こる現象である。このモードについても一部であるが FEM 解析でも求まった。

第 5 章では異なる積層構造をもつ 2 種類の積層楕円筒殻を製作し、4 章と同様の実験を行った。長軸と短軸の比（扁平率）は 0.2 である。楕円形状のため複雑な振動モードが観察された。部分的に液体の入ったアングルプライ積層の楕円筒殻でも混合モードが観測された。これらは円筒殻と同様の原因の他に、曲率の変化の影響も関係する。これらのモードの一部は FEM 解析でも求まり、その中には振動数曲線上に存在する固有値が含まれていることを示した。

第 6 章では本論文のまとめとして、本研究の成果について述べる。

## 論文審査結果の要旨

殻構造物は貯蔵用タンクとして多数存在している。近年、省エネルギーのために殻構造物も軽量化が求められ、繊維強化プラスチック(FRP)の殻容器も使用されはじめた。さらに、積層材料として炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を利用した積層複合殻の開発が航空宇宙分野をはじめ新しい工業分野で進められている。積層複合殻の振動特性を明らかにすることは、それらの殻の構造強度や耐震を考えるうえで重要なことである。本論文は、液体を入れた積層複合殻の振動特性を有限要素法と実験により検討したものである。

論文は全6章で構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的をまとめている。

第2章では、CFRP積層複合厚肉円筒殻の内部に液体を入れた場合の自由振動を有限要素法により解析し、配向角と液位が振動特性に及ぼす影響を明らかにしており、積層複合厚肉円筒殻の基本設計に寄与するものである。

第3章では、CFRP積層複合厚肉多重同心円筒殻の内部に液体を入れた場合の自由振動を有限要素法により解析している。この系の振動数と振動モードについて、配向角と内側殻及び外側殻の液位との関係を明らかにしており、積層複合厚肉多重同心円筒殻に関しての基礎的知見を示すとともに、それらの殻設計に寄与するものである。

第4章では、CFRP積層複合薄肉円筒殻と等方性円筒殻を製作し、液体を入れて実験を行い、それらの振動特性を実験的に明らかにしている。空のアングルプライ積層複合円筒殻とクロスプライ積層複合円筒殻の振動数は、等方性円筒殻の振動数と比較すると円周方向波数の大小によって、積層の違いにより差が表れる。また、部分的に液体が入ったアングルプライ積層複合円筒殻では、その振動モードにおいて、円筒殻の上部と下部において円周方向波数の異なる「混合モード」が発生することを観察し、有限要素法の解析でも示され、その妥当性を確認している。この結果は積層複合薄肉円筒殻の最適設計に寄与する。

第5章では、CFRP積層複合薄肉楕円筒殻と等方性楕円筒殻を製作し、液体を入れて実験を行い、それらの振動特性を明らかにしている。積層複合楕円筒殻では積層複合円筒殻とは異なり、曲率の違いが振動特性に表れることを示している。アングルプライ積層複合楕円筒殻においても「混合モード」を実験的に観察しており、積層複合円筒殻と比較して、振動数のより低い領域で発生することを示している。また、有限要素法解析によってもその存在を確認している。積層複合薄肉楕円筒殻におけるこの「混合モード」の観察は新しい知見である。

第6章は結論であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、液体の入った積層複合殻の振動特性を有限要素法と実験により明らかにし、積層複合殻の固有な振動現象に新たな知見を与えたものであり、機械工学と構造工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。